第46卷 第8期 2023年8月
核 技 术 NUCLEAR TECHNIQUES
www.hjs.sinap.ac.cn
Vol.46, No.8 August 2023

不稳定核奇特结构研究的发展与展望

陈 莹 叶沿林 魏 康
（北京大学物理学院 核物理与核技术国家重点实验室 北京 100871）

摘要 原子核是一个由核力主导的量子多体复杂系统，相对容易发生形变、转动振动、裂变、集团共振等整体性变化。过去的三十多年，我们见证了实验室可达的核素版图的迅速扩大，以及在不稳定核研究中的一系列新发现和新突破。典型的例子如晕核及其关联的奇特结构现象、采用消色差磁谱仪实现弱流条件下在束γ谱学测量从而观察不稳定核区壳演化、不稳定核基本性质测量与新幻数、丰富的多核子关联与集团和分子结构等。未来在新的核素版图区域，特别是中重质量丰中子核区，会涉及极端奇特结构、核天体r-过程、攀登超重岛路径等重大科学问题。为了探索这些问题，世界各科技大国都在建设能够产生远离稳定线放射性核束的大科学装置，不稳定核奇特结构的研究也将迎来更大的突破。

关键词 不稳定核，奇特结构，晕核，在束γ谱学，新幻数
中图分类号 TL99
DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080020
关联视频DOI: 10.12351/ks.2208.0964



Progress and perspective of the research on exotic structures of unstable nuclei

CHEN Ying YE Yanlin WEI Kang
(*School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract The nucleus is a quantum many-body complex system governed by the nuclear force, and it is prone to global changes such as deformation, rotation, vibration, fission, and clustering. In the past >30 a, we have witnessed the rapid expansion of the experimentally attainable nuclear chart and new discoveries and breakthroughs in studies on unstable nuclei. Examples include the halo nuclei and the associated exotic structural phenomena, the shell evolution observed using in-beam γ spectroscopy through the application of the achromatic magnetic spectrometer, the measurement of the basic properties of unstable nuclei, and the discovery of new magic numbers and rich phenomena in multi-nucleon correlations along with the formation of clusters and molecules. In the coming years, the expanded area of the nuclear chart—particularly the medium-heavy-mass neutron-rich region—will be the host of extreme exotic structures, the astrophysical r-process, and the reaction pathways to reach the superheavy island. Therefore, many new-generation radioactive ion-beam facilities are under development worldwide, and essential breakthroughs are foreseen.

Key words Unstable nuclei, Exotic nuclear structure, Halo nuclei, In-beam γ-ray spectroscopy, New magic numbers

原子核是由核力主导的量子多体复杂系统。核力是量子色动力学（Quantum Chromodynamics，

国家重点研发计划(No.2018YFA0404403)、国家自然科学基金(No.12027809)资助
第一作者：陈莹，女，1998年出生，2020年毕业于福建师范大学，现为博士研究生，研究领域为放射性束物理实验
通信作者：叶沿林，E-mail：yeyl@pku.edu.cn
收稿日期：2023-02-19，修回日期：2023-04-14
Supported by National Key R&D Program of China (No.2018YFA0404403) and National Natural Science Foundation of China (No.12027809)
First author: CHEN Ying, female, born in 1998, graduated from Fujian Normal University in 2020, doctoral student, focusing on radioactive beam physical experiment
Corresponding author: YE Yanlin, E-mail: yeyl@pku.edu.cn
Received date: 2023-02-19, revised date: 2023-04-14

QCD)描写的强相互作用经强子屏蔽之后泄漏出来的剩余相互作用，是类似于化学键的短程相互作用。质子和中子通过核力作用聚集成原子核，这样的量子多体复杂系统有自己的特征，其中一个很重要的特点是多样性和相对易变性。比如原子有很强的核心，主导着核外电子的运动，因此原子基本是球形，不大会出现显著的形变甚至裂变等。又比如强子有极其强大的边界限制(Confinement)，所以也难以发生形变、振动或者裂变等。原子核既没有很稳定的中心(平均场是众多核子凑成的)，边界也很模糊，所以比较容易发生整体性变化，也就是我们常见的形变、转动振动、各种类型的粒子发射和衰变、裂变等。

原子核的多样性大体上可以用图1来形象地表示[1]。基态和低激发态的原子核可以用壳模型(包含粒子-空穴激发等)做比较好的描写。此时原子核也可以发生振动、转动等集体运动，也会有结团效应(如α集团结构的影响等)。沿着能量激发轴(E^*)，可以出现高自旋、超形变、巨共振和集团共振等新的结构显现。进一步地激发，可以出现α凝聚状态、核子热平衡气态等相变现象(高能重离子碰撞产生的亚核子自由度的相变，是高能领域的重要研究对象，这里不涉及)。沿着核子数增加方向(A轴)，则会发生我们熟悉的α集团形成和衰变、裂变等现象。近年来，人类实验可及的核素版图向稳定线两侧的丰中子或丰质子不稳定核区域扩展，发现了晕核、分子集团结构、多核子关联等一系列奇特现象，大大丰富了人们对原子核结构的认识。

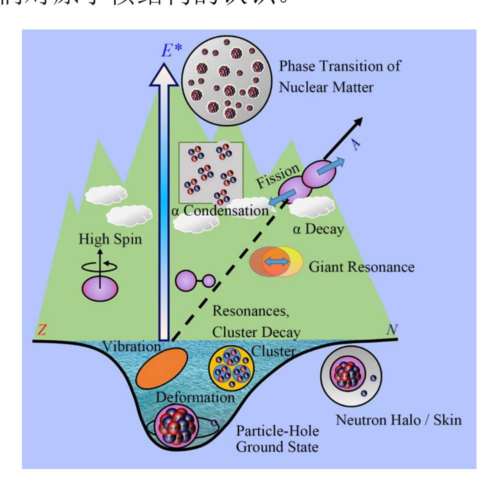


图1 原子核的多样性图示[1]
Fig.1 Schematic of the multiple facets of the nucleus[1]

这种结构图像的变化，有物理上的深刻内涵。在量子力学框架下描写多体系统，都有一个怎么给出哈密顿量的问题。通常的办法，都是要先选取一个能代表主导的相互作用同时理论上也比较好处理的近似哈密顿量H_0，用它解出的本征态作为一组基矢来展开物理上比较真实的多体量子态。然后加入剩余相互作用H_r，用微扰论的办法(可以多级展开)来求得尽可能真实的多体量子态(也就是定出在基矢上的展开系数)。也就是说，对体系里的每个成员来说，它获得的结合能(或者分离能S)大体来自两个部分[2]：

$$S \sim -\lambda - \Delta \tag{1}$$

其中：λ项来自与H_0相关的主导相互作用(如平均场作用)，而Δ项来自剩余相互作用(如对关联等)。显然，H_0和H_r的选取如果与体系的真实相互作用状态相一致，则解出的量子态与实验结果会比较一致。如果H_0和H_r的描写与实际情况相差很大，甚至主次颠倒，则微扰处理的结果很难符合实测结果。这种情况在原子核里实际是发生的。比如当核的表面出现集团结构时，集团中核子感受的来自附近核子的局部关联作用，可能强于来自远处的平均场作用，也就是实际出现了多中心的情况。此时在用通常的$H_0 + H_r$方式处理时，就很难描写真实状态了。这应该就是平均场(壳模型)框架下理论计算难以给出实验观测到的集团结构状态(比如^{12}C的Hoyle态)的原因。显然，当核素版图扩展到滴线区的时候，核内许多核子的结合能很小而分布范围扩大，容易在核表面形成复杂的核子关联和集团结构。此时常规的单中心主导的$H_0 + H_r$难免需要出现实质性的改变。这是需要认真关注的根本性问题。

本文概略介绍过去三十多年不稳定(放射性)原子核研究的重要突破，并展望未来需要特别关注的问题。

1 晕核的发现

1985年，实验发现^{11}Li、^{6}He等的相互作用截面，相比于它们相邻的同位素都有显著的增大[3]，这实际上是基于核物质的强吸收性质。1987年，中子晕核的概念被首次提出[4]，用于解释^{11}Li等的截面(半径)的反常增大。这里同时提出了双中子集团(Dineutron)的概念，预言了软偶极共振和与此关联的大大增强的库伦破裂截面。通常的巨共振出现在激发能很高的地方，等效的光子能量需要达到10~20 MeV范围。相比之下，激发软偶极共振就容易多了，只需要1 MeV甚至更低的虚光子能量就可以。通常采用^{208}Pb或者^{197}Au靶对晕核进行库伦激发，可以使破裂截面提高十来倍。实验很快证实了^{11}Li库伦激发的破裂截面确实有极大的增强[5]。其后这也成为识别晕核的重要判据之一，比如^{31}Ne被识别为晕核就是通过这个特征[6]。中子晕核概念的完全确立是在2006年，^{11}Li的电荷半径被直接测

量之后，这里用到了原子超精细结构的激光谱测量方法[7]。由此确认 ^{11}Li 的超大半径只是由中子分布范围的膨胀引起的，而其质子半径并未增大。晕核中关联紧密的双中子集团(Dineutron)的研究，则一直持续到现在，还有大量的实验和理论工作要做。这里涉及费米子系统到玻色子系统的转变以及中子星表面结构等，因此一直是一个研究热点，但涉及的实验和理论问题均有很大难度[8]。

2 在束γ谱学的应用

晕核的价核子的空间分布膨胀，对应的是动量分布变窄。这个动量分布是相对于原子核质心的，因此价核子的动量分布宽度，也就是与之对应的核心碎片(比如 ^{11}Li 中的 ^{9}Li)的动量分布宽度。实际上，在晕核概念提出的一年之后，就测量到 ^{11}Li 破碎后 ^{9}Li 核心碎片的动量分布显著变窄[9]。由此也提供了晕核结构的另一个判据。

由于核心碎片横向动量展宽受散射机制的影响比较大，后来在美国密歇根州立大学(Michigan State University，MSU)发展了测量纵向动量分布的办法[10]。为了准确测量由于原子核内部运动造成的核心碎片动量展宽，首先必须尽可能消除由入射束流本身带来的动量展宽。这就需要使用消色差磁谱仪，也就是使得在物理靶之前不稳定核束流造成的动量展宽，正好在靶后的磁谱仪焦平面上得到消除。而弹核内部的动量分布(在靶上发生破碎反应之后由核心碎片带出来)，就可以在磁谱仪焦平面上得以充分展开和精确测量。这项技术 1992 年得以在 MSU 实现[10]，其他放射性核束实验室(如德国亥姆霍兹重离子研究中心 GSI (Gesellschaft fur Schwerionenforschung)等)也相继建立[11]。随后，理论和实验发现纵向动量分布展宽与价核子的角动量有很好的对应关系，因此也可以用来分析抽取角动量。以往实验测量角动量的办法主要依靠角分布(微分截面)，而大角度范围测量通常要求很高的束流强度(> 10^{8} particles·s^{-1})。这对于稳定核实验不难达到，但对于不稳定核实验基本不可能。有了测量纵向动量展宽的方法，测量只需在0°附近开展，这就大大降低了对束流强度的要求，可以在 > 10^{2} particles·s^{-1} 流强条件下得到所需的结果。这大大拓展了不稳定核实验的范围，是一项革命性的技术运用。为了在测量纵向动量(对应角动量)的同时，确定被移去的价核子的能态，通常在靶附近放置γ光子探测器。这就构成在束γ谱学。实际上，价核子通常最重要的两个物理量，就是其量子态的能量和角动量。在束γ谱学的实现和广泛应用，为研究不稳定核壳演化提供了大量重要的数据[11]。

3 基本性质测量与新幻数的发现

稳定线附近的轻核，在中子数为8和20时候，再结合一个中子的结合能(分离能)明显减小，这是8和20为中子幻数的依据之一。但对于远离稳定线的原子核(同位旋三分量增大)，上述现象从中子数为20移动到了中子数为16。由此提出了新幻数的概念[12]。

除了可以通过质量测量推出中子分离能从而研究幻数位置以外，原子核的第一个 2^{+} 激发态的能量差和衰变强度，也是幻数的重要表征。实验上通过第一个 2^{+} 激发态测量，在丰中子核 ^{54}Ca 中发现了中子新幻数 34[13]。

值得一提的是，原子核的电荷半径测量也可以用于检验新幻数。2021 年，实验上首次通过将质子幻数核钙附近电荷半径的测量拓展到中子数 32 之上，结果显示没有表现出新幻数特征[14]。

4 核子的奇特关联结构

随着各种测量技术的提升，多个国家的研究人员在原子核奇特结构方面取得了一些重要的发现。奇特结构往往体现为少数核子之间的强关联，形成新的结构自由度和在这种自由度上的有效相互作用。对于奇特结构，通常的平均场壳模型难以适用。原因在于从根本上来讲，部分核子的相互作用环境发生了变化，来自中心平均场的作用不再是主导作用，因而壳模型中哈密顿量的主要项和微扰项的选取与实际状况不一致(参见引言部分的讨论)。

前面在晕核部分已经提到了双中子关联，它仍然是丰中子体系中影响深远且有待研究的重要问题[8]。

前些年理论计算对四中子共振态提出了预言[15]。2022 年实验上发现了四中子共振态存在的证据[16]。实际上丰质子体系的价质子之间也可能存在很强的关联。2021 年实验上在非束缚核 ^{18}Mg 中首次观测到了四质子关联态[17]。2021 年实验上通过直接敲出反应，从重核 ^{A}Sn 中直接敲出了表面低密度区的α集团[18]，证实了重核表面的集团结构，为重核α衰变的理论描写提供了依据。

原子核的集团结构是一种普遍存在的奇特现象，20 世纪 30 年代就有系统性分析。1968 年，Ikeda 等提出阈规则[19]。多数稳定原子核基态中没有显著的集团结构。当原子核被激发到某种集团破裂阈附近时，原子核由于集团之间结合能的降低而体积发

生膨胀，部分核子容易在局部组成相对紧密的集团结构(特别是α集团)，形成一种相对稳定的状态。当然，从量子系统的角度，集团共振态出现的具体位置，与集团之间的相互作用势、波函数在势垒内外的连续性特征、整体波函数的反对称要求等密切相关。随着激发能越来越高，原则上集团的数目会越来越多，直到形成多α体系。

将Ikeda图扩展到丰中子核区域，会出现更加丰富的集团结构[20]。对于弱束缚的丰中子原子核，由于价中子的存在，它可以呈现出类似于原子分子物理中的分子轨道构型。集团以一定的方式排列，产生两个中心或者多个中心的构型，而价中子在多个核心之间的分子轨道上运动，作用类似电子在分子轨道中形成的共价键。随着丰中子原子核的激发能的升高，价中子与集团之间成键具有多样性，使得原子核分子结构更加丰富。当然，作为量子体系具体能够实现的构型，取决于阈效应、有效相互作用、量子态正交性、波函数的渐近特征等。

目前，在轻核中实验研究比较多的集团结构如图2所示。^{8}Be基态就是典型的双α集团结构。^{10}Be、^{12}Be可以看作是在^{8}Be的双α核心基础上增加了价中子，实验上也已经证实了这种集团结构[20−21]。

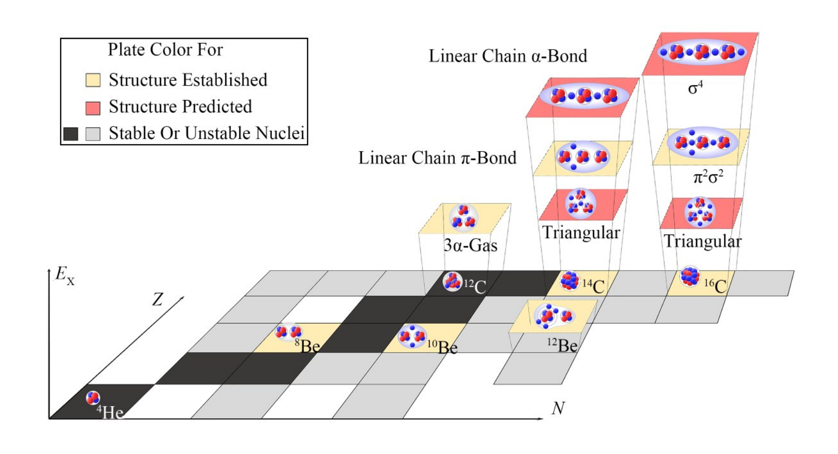


图2 轻核中的集团结构

Fig.2 Cluster structure for light nuclei

目前对分子集团结构的实验研究聚焦在C同位素链。^{12}C的0_2^+(Hoyle)态是典型的3α结构，但对其排列方式一直有争议。目前比较公认的是其处于类似α凝聚的状态(图2)，也就是所有α粒子均在扩张环境中按s波运动[22]。理论预言^{14,16}C中存在多种类型的三中心分子结构，包括三角形，π-σ键混合的线性链状结构，以及纯σ键的线性链状结构(图2)[23−24]。其中线性链状结构特别引人注目，因为这是一种极端奇特的结构。这里的π键是指价中子主要处于α集团连线的两侧，而σ键是指价中子主要处于α集团连线上，因此后者会给出最长，也就是转动惯量最大的链[20]。实验上，目前已经确认了^{14,16}C激发态中的π-σ键混合型线性链状结构[25]，^{14,16}C中其他两种链状结构(图2)正在研究的过程中，已经有若干实验证据。

实验上测量和判定原子核集团结构的方法有很多，包括测量共振态的能量和自旋并构成转动带；通过测量集团衰变分支比导出原子核内部集团结构谱因子；测量特征激发强度(如较小能量间隔的单极跃迁强度)；测量选择性衰变路径等。这些方法在上述报导实例的文章中均有描写，这里不再详述。集团结构的理论和方法研究，可参考此前的综述文章[26−28]。

5 展望

过去三十多年，原子核结构的研究向不稳定核版图扩展，取得了一系列重要的新发现，推动了理论发展。核物理的一个重要特征，是基础和应用并重，同时支撑核天体等交叉学科的研究。不稳定核的研究实际上还处于起步阶段，核素版图的大部分还等待未来几十年去开发。特别是中重质量丰中子核区，将聚集奇特结构、核天体r-过程、攀登超重岛路径等重大科学问题。为了探索这些问题，世界各科技大国都在建设能够产生远离稳定线放射性核束的大科学装置(图3)，包括正在运行的和未来几年将要投入使用的新型(第3~4代)装置。

就奇特结构而言，弱束缚体系的表面扩张自然会引起相应的结构变化，特别是集团和多中心的出

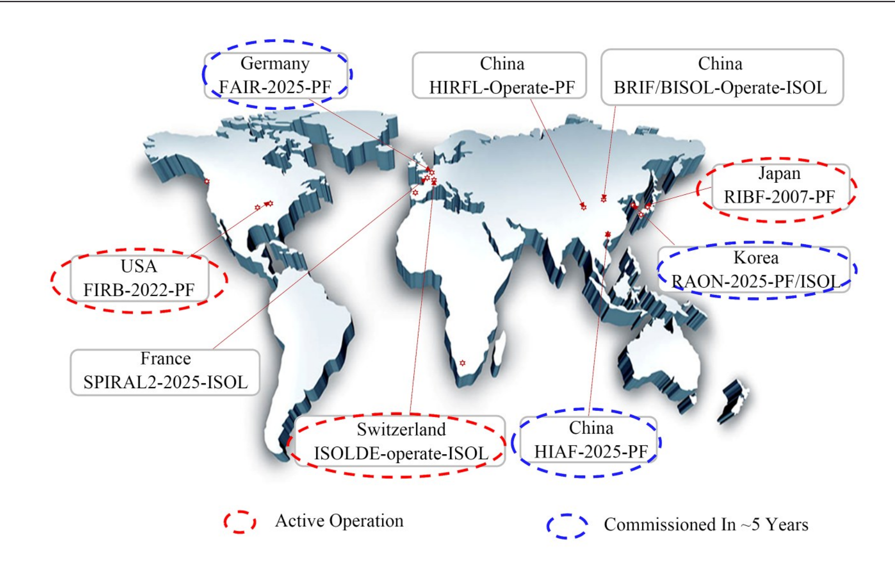


图3 用于不稳定核研究的第新一代大科学装置
Fig.3 New-generation RIB facilities worldwide

现，这会推动新的理论框架的出现。实验探测装置也需要大大发展，特别是多粒子(包括多中子)和多碎片发射的符合测量，需要一系列新型探测技术和方法的支撑。

作者贡献声明 陈莹负责根据报告整理文稿；叶沿林为报告人并负责本篇文稿审定；魏康协助作图。

参考文献

1 Kanada-En'yo Y, Kimura M, Ono A. Antisymmetrized molecular dynamics and its applications to cluster phenomena[J]. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2012, **2012**(1): 01A202. DOI: 10.1093/ptep/pts001.

2 Heyde K L G. Basic ideas and concepts in nuclear physics: an introductory approach[M]. 3rd Ed. Bristol: Institute of Physics, 2004.

3 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, *et al.* Measurements of interaction cross sections and nuclear radii in the light p-shell region[J]. Physical Review Letters, 1985, **55**(24): 2676 – 2679. DOI: 10.1103/PhysRevLett.55.2676.

4 Hansen P G, Jonson B. The neutron halo of extremely neutron-rich nuclei[J]. Europhysics Letters (EPL), 1987, **4**(4): 409 – 414. DOI: 10.1209/0295-5075/4/4/005.

5 Kobayashi T, Shimoura S, Tanihata I, *et al.* Electromagnetic dissociation and soft giant dipole resonance of the neutron-dripline nucleus ^{11}Li[J]. Physics Letters B, 1989, **232**(1): 51 – 55. DOI: 10.1016/0370-2693(89)90557-1.

6 Nakamura T, Kobayashi N, Kondo Y, *et al.* Halo structure of the island of inversion nucleus ^{31}Ne[J]. Physical Review Letters, 2009, **103**(26): 262501. DOI: 10.1103/physrevlett.103.262501.

7 Sánchez R, Nörtershäuser W, Ewald G, *et al.* Nuclear charge radii of ^{9,11}Li: the influence of halo neutrons[J]. Physical Review Letters, 2006, **96**(3): 033002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.033002.

8 Kubota Y, Corsi A, Authelet G, *et al.* Surface localization of the dineutron in ^{11}Li[J]. Physical Review Letters, 2020, **125**(25): 252501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.252501.

9 Kobayashi T, Yamakawa O, Omata K, *et al.* Projectile fragmentation of the extremely neutron-rich nucleus ^{11}Li at 0.79 GeV/nucleon[J]. Physical Review Letters, 1988, **60**(25): 2599 – 2602. DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.2599.

10 Orr N A, Anantaraman N, Austin S M, *et al.* Momentum distributions of ^{9}Li fragments following the breakup of ^{11}Li[J]. Physical Review Letters, 1992, **69**(14): 2050 – 2053. DOI: 10.1103/physrevlett.69.2050.

11 Gade A. Nuclear spectroscopy with fast exotic beams[J]. Physica Scripta, 2013, **T152**: 014004. DOI: 10.1088/0031-8949/2013/t152/014004.

12 Ozawa A, Kobayashi T, Suzuki T, *et al.* New magic number, N=16, near the neutron drip line[J]. Physical Review Letters, 2000, **84**(24): 5493 – 5495. DOI: 10.1103/physrevlett.84.5493.

13 Steppenbeck D, Takeuchi S, Aoi N, *et al.* Evidence for a new nuclear 'magic number' from the level structure of ^{54}Ca[J]. Nature, 2013, **502**(7470): 207 – 210. DOI: 10.1038/nature12522.

14 Koszorús Á, Yang X F, Jiang W G, *et al*. Charge radii of exotic potassium isotopes challenge nuclear theory and the magic character of $N = 32$[J]. Nature Physics, 2021, **17**(4): 439 – 443. DOI: 10.1038/s41567-020-01136-5.

15 Li J G, Michel N, Hu B S, *et al*. *Ab initio* no-core Gamow shell-model calculations of multineutron systems[J]. Physical Review C, 2019, **100**(5): 054313. DOI: 10.1103/physrevc.100.054313.

16 Duer M, Aumann T, Gernhäuser R, *et al*. Observation of a correlated free four-neutron system[J]. Nature, 2022, **606**(7915): 678 – 682. DOI: 10.1038/s41586-022-04827-6.

17 Jin Y, Niu C Y, Brown K W, *et al*. First observation of the four-proton unbound nucleus ^{18}Mg[J]. Physical Review Letters, 2021, **127**(26): 262502. DOI: 10.1103/physrevlett.127.262502.

18 Tanaka J, Yang Z H, Typel S, *et al*. Formation of α clusters in dilute neutron-rich matter[J]. Science, 2021, **371**(6526): 260 – 264. DOI: 10.1126/science.abe4688.

19 Ikeda K, Takigawa N, Horiuchi H. The systematic structure-change into the molecule-like structures in the self-conjugate 4n nuclei[J]. Progress of Theoretical Physics Supplement, 1968, **E68**: 464 – 475. DOI: 10.1143/PTPS.E68.464.

20 von Oertzen W, Freer M, Kanada-En'yo Y. Nuclear clusters and nuclear molecules[J]. Physics Reports, 2006, **432**(2): 43 – 113. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.07.001.

21 Yang Z H, Ye Y L, Li Z H, *et al*. Observation of enhanced monopole strength and clustering in ^{12}Be[J]. Physical Review Letters, 2014, **112**(16): 162501. DOI: 10.1103/physrevlett.112.162501.

22 Funaki Y, Horiuchi H, Tohsaki A. Cluster models from RGM to alpha condensation and beyond[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2015, **82**: 78 – 132. DOI: 10.1016/j.ppnp.2015.01.001.

23 Baba T, Kimura M. Three-body decay of linear-chain states in ^{14}C[J]. Physical Review C, 2017, **95**(6): 064318 – 064326. DOI: 10.1103/PhysRevC.95.064318.

24 Baba T, Liu Y, Han J X, *et al*. Pure σ-bond linear chain in ^{16}C[J]. Physical Review C, 2020, **102**(4): 041302. DOI: 10.1103/physrevc.102.041302.

25 Liu Y, Ye Y L, Lou J L, *et al*. Positive-parity linear-chain molecular band in ^{16}C[J]. Physical Review Letters, 2020, **124**(19): 192501. DOI: 10.1103/physrevlett.124.192501.

26 Liu Y, Ye Y L. Nuclear clustering in light neutron-rich nuclei[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(12): 184. DOI: 10.1007/s41365-018-0522-x.

27 Ma Y G. New type of double-slit interference experiment at Fermi scale[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(1): 16. DOI: 10.1007/s41365-023-01167-6.

28 Wang X N. Vector meson spin alignment by the strong force field[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(1): 15. DOI: 10.1007/s41365-023-01166-7.